

刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 2016. 中国降水云云底高度的估算和分析. 气象, 42(9): 1135-1145.

## 中国降水云云底高度的估算和分析<sup>\*</sup>

刘雪梅 张明军<sup>\*</sup> 王圣杰 赵培培 王 杰 周盼盼

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**提 要:** 基于国家气象信息中心发布的 622 个气象站点 1960—2013 年的降水量、气压、气温、水汽压和相对湿度等日数据及 249 个气象站点 2013 年 8 月 25 日至 9 月 25 日 02、08、14 和 20 时数据, 利用中国气象局、Barnes 和 Georgakakos 的经验公式来计算抬升凝结高度从而近似降水云云底高度, 归纳出中国降水云云底高度的时空分布特征。结果表明: (1) 在整体、季节(除冬季外)、小时和降水量等级为 I 级( $P < 10$  mm)、II 级( $10 \text{ mm} \leq P < 25$  mm)时的空间分布特征基本一致, 即自东南向西北逐渐增高, 没有显著的年际差异。(2) 区域差异显著, 就四大自然区(北方地区、南方地区、西北地区和青藏高原地区)而言, 青藏高原地区和西北地区的降水云云底高度高于平均云底高度, 且除青藏高原地区外其他地区的云底高度呈逐年下降的趋势。(3) 从季节差异看, 春、夏季的降水云云底高度高, 冬季的云底高度最低。(4) 日变化明显, 08 时的降水云云底高度最低, 14 时最高。(5) 利用三种算法算出中国降水云云底高度和降水量的相关系数分别是  $-0.47$ 、 $-0.46$ 、 $-0.44$ , 中国云底高度和相对湿度相关系数分别是  $-0.81$ 、 $-0.81$ 、 $-0.79$ , 均呈负相关。

**关键词:** 抬升凝结高度, 云底高度, 时空分布, 地面资料

中图分类号: P413

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.011

## Estimation and Analysis of Precipitation Cloud Base Height in China

LIU Xuemei ZHANG Mingjun WANG Shengjie ZHAO Peipei WANG Jie ZHOU Panpan

Geography and Environmental Science College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070

**Abstract:** Based on daily data of precipitation, air pressure, temperature, average vapor pressure and average relative humidity in 622 stations released by the National Meteorological Information Centre of China during 1960—2013 and the data collected at 02:00, 08:00, 14:00 and 20:00 BT from 25 August to 25 September 2013 by 249 stations, the algorithms of China Meteorological Administration, Barnes and Georgakakos are applied to calculate the height of lifting condensation level to approximate height of precipitation cloud base, and then the spatio-temporal distribution characteristics of cloud base height in China are analyzed. The results indicate that (1) the spatial distribution of precipitation cloud base heights on the annual, seasonally and hourly bases show consistent with precipitation levels I and II. The cloud base height gradually increases from southeast to northwest, and the interannual difference is not significant. (2) The regional difference is significant. In term of four nature zones in China (North, South, Northwest and the Tibetan Plateau), the precipitation cloud base heights of the Northwest and the Tibetan Plateau are higher than the national mean. The base height decreases gradually year by year except the Tibetan Plateau. (3) Seasonally, the precipitation cloud base height in spring and summer is higher, and the lowest is in winter. (4) Diurnal variation of the precipitation cloud base height is significant and the lowest at 08:00 and the highest is at 14:00. (5) By using the three algorithms, the correlation coefficients between

\* 国家自然科学基金项目(41461003)和全球变化国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801)共同资助

2015 年 10 月 15 日收稿; 2016 年 5 月 24 日收修定稿

第一作者: 刘雪梅, 主要从事气候变化与可持续发展方面的研究. Email: geoliuxuemei@163.com

通信作者: 张明军, 主要从事气候变化与冰川方面的研究. Email: mjzhang2004@163.com

the cloud base height and precipitation are  $-0.47$ ,  $-0.46$  and  $-0.44$ , and between the cloud base height and relative humidity are  $-0.81$ ,  $-0.81$  and  $-0.79$ , respectively.

**Key words:** lift condensation height, cloud base height, spatio-temporal distribution, surface observation data

## 引 言

云是全球气候变化的驱动因子之一,调节着地气系统的辐射收支和水分循环(Stubenrauch et al, 2013)。IPCC 第五次报告中明确指出,云的辐射效应在气候模式中具有很大的不确定性(Boucher et al, 2013)。此外,云还是人工影响天气工作的主要对象和参考依据(高茜等, 2011; 赵姝慧等, 2014),也影响着现代军事气象保障,在现代军事活动中扮演着重要的角色(严卫等, 2012)。因此,准确地获得云的各种宏微观特征信息具有重要的科学意义、生产意义和军事意义。

云底高度是云宏观物理量的重要参数,获得云底高度及其在时空上的演变规律有利于天气检测预报和气候异变显示(Dong et al, 2006)。国际卫星气候学计划(ISCCP)利用卫星收集的云辐射资料集反演了全球云物理参量(Schiffer et al, 1983)。卫星监测具有覆盖范围广、信息源可靠、精度高的特点而被广泛应用,其中云垂直结构的研究是云物理研究的焦点(Cesana et al, 2012; 周毓荃等, 2010),但是对于水平方向上云底高度的演变缺乏实质性的研究;鉴于卫星采用自上而下的观测模式,对云顶高度测量的一致性较好,对云底高度测量的一致性则较差(Dessler et al, 2006; 周非非等, 2010; 杨冰韵等, 2014; Ji et al, 2014),并且受云类型和水汽的影响,漏测现象严重(陶法等, 2013)。潘琳珺等(2012)利用地基高光谱干涉仪 AERI 反演等效云底高度,对低云和中云的有效发射率分别达  $0.967$  和  $0.781$ ,但是对高云的模拟较差;章文星等(2007)利用地基红外亮温反演云底高度,但是受到气溶胶的影响较大;Nishi 等(2011)通过查表数据集来估算云底高度,但受数据量的影响较大,海量数据时不易查询;基于双目成像原理测量云底高度的方法随着双目成像视觉传感器和数字摄像技术的不断发展也广泛应用,但是受仪器精度和标较的影响较大(陶法等, 2013; Andreev et al, 2014)。目前,学者们对抬升凝结高度(lifting condensation level, LCL)进行了一

系列的深入研究,并且利用计算 LCL 来近似云底高度,此方法利用气象台站的地面温度、露点温度、相对湿度等观测资料即可进行估算,受气溶胶和云类型的影响较小,并且气象资料获取较为容易,便于广泛应用于气候和水文模式的参数输入(Barnes, 1968; Georgakakos et al, 1984; 山夫, 1987; 何小东等, 2012; Nuijens et al, 2014)。

综上所述国内外学者对降水云的云底高度和 LCL 的研究,其大多利用遥感、激光仪和地面资料进行云底高度的反演和估算,但缺少对水平方向的时空变化特征的归纳。本文利用中国气象局(2007)推荐的经验公式、Barnes (1968)的经验公式和 Georgakakos 等(1984)的经验公式计算 LCL 的方法来近似得到降水云的云底高度,从而归纳出中国地区云底高度的时空分布特征,并且讨论了云底高度和降水量、相对湿度的相关性,为中国云的物理特征研究提供参考。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据来源

本文利用国家气象信息中心提供的 249 个国家级台站一日 4 次的地面常规资料中的气温、气压和露点温度等小时数据;622 个国家级台站中的降水量、气压、气温、相对湿度及水汽压等日数据来计算 LCL 从而近似降水云的云底高度(以下简称云底高度)。国家站的筛选标准是如果日数据的所需值有一个是空白、微量或是缺测则给予删除,小时的数据如果所需值是空白或缺测此站给予删除,本文研究降水时的云底高度,即把非降水日给予删除。然后利用 ArcGIS 绘制全国降水云的云底高度的空间分布图,运用 SigmaPlot 绘制时间变化图。

### 1.2 研究方法

云底高度的计算方法:基于三种经验公式利用地面资料来计算 LCL,从而近似降水云的云底高度,来对中国降水云的云底高度进行估算和分析。

(1)方法一,中国气象局(2007)公布的经验公式

$$H = aT \quad (1)$$

$$T = T_s - T_d \quad (2)$$

式中, $H$ 是LCL的近似值(单位:m); $T$ 是地面温度和露点温度的温差(单位:°C); $a$ 一般取值为124(单位: $\text{m} \cdot \text{°C}^{-1}$ ); $T_s$ 和 $T_d$ 分别是地面温度(单位:°C)和露点温度(单位:°C)。由于 $a$ 的精确程度可以严重影响到 $H$ 的精度,所以 $a$ 取值的精确程度是此方法的限制性因素,并且受 $T$ 范围影响也比较大,不同 $a$ 的 $T$ 的适用范围不同。但是,此方法简单方便,且较易推行,所需参数方便获取,所以该方法被广泛应用于LCL的近似计算中。

(2)方法二,Barnes(1968)的经验公式是通过计算出抬升凝结高度上的温度和相应的气压再通过拉普拉斯压高公式来计算LCL。

$$T_{\text{cl}} = T_d - (0.001296T_d + 0.1963)(T - T_d) \quad (3)$$

$$p_{\text{cl}} = p(T_{\text{cl}} + 273.15/T + 273.15)^{7/2} \quad (4)$$

$$H = 18400(1 + at)\lg(p/p_{\text{cl}}) \quad (5)$$

式中, $T_{\text{cl}}$ 、 $p_{\text{cl}}$ 分别是抬升凝结高度上的气温和气压, $T$ 和 $T_d$ 分别是地面的气温和露点温度, $p$ 是地面的气压(单位:hPa), $H$ 是LCL也就是近似的最低云底高度, $a$ 取值为 $1/273$ , $t$ 为LCL上的温度值和地面温度值之差(单位:°C)。通过公式(4)可以计算出LCL上的温度(单位:°C),式(5)可以计算出LCL上的气压(单位:hPa),通过式(6)拉普拉斯压高公式即可得出LCL值。

(3)方法三,Georgakakos(1984)提出的经验公式是以气压值来表示凝结高度。

$$p_{\text{cl}} = \frac{p}{(T - T_d/223.15 + 1)^{7/2}} \quad (6)$$

式中, $p_{\text{cl}}$ 、 $p$ 、 $T$ 、 $T_d$ 分别是LCL上的气压、地面气压、地面气温和露点温度,在算出LCL上的气压后,根据式(6)的拉普拉斯公式可以算出LCL从而来近似最低的云底高度。在用小时数据进行计算的时候直接可以下载露点温度参与计算,但是在用日数据的时候没有直接的露点温度参与计算,所以就要采用公式计算,用变形的马格纳斯公式即可

$$T_d = \frac{243.92\lg(e_a/611)}{7.69 - \lg(e_a/611)} \quad (7)$$

式中, $T_d$ 、 $e_a$ 分别表示露点温度和实际水汽压(单位:hPa)。

方法二和方法三均是由气压表示LCL的方法,并且均用到了拉普拉斯公式,多次经验公式的运算导致精度有待加强,但由于其参数多为较易获取的气象参数,并且经过多次的参数修正,所以应用广泛。

## 2 结果分析

### 2.1 空间分布特征

为了更好地研究中国降水云的云底高度的空间分布特征,本文主要从整体变化、季节变化、日变化和不同降水量等级变化来进行研究。

#### 2.1.1 空间分布的整体变化

中国降水云的云底高度由于云的类型和云辐射强度的分布不同,其空间的分布状态差异明显(Wang et al, 2004)。图1表示的是中国1960—2013年的日均云底高度的空间分布。图1a、1b和1c分别是利用中国气象局(2007)、Barnes和Georgakakos的经验公式算得,其中云底高度的整体趋势均是自东南向西北逐渐增高。江淮地区的云底高度是全国最低值,新疆中部的云底高度是全国最高值。

#### 2.1.2 空间分布的季节变化

季节差异下大气中的水汽含量和太阳辐射量不同,则降水云的云底高度在不同季节的空间分布有所差异(Rossow et al, 1990)。就图2中2a~2i来看,春季、夏季和秋季的变化趋势基本一致,即自东南向西北逐渐增高。其中江淮地区和黑龙江东部的云底高度较低,新疆中部的云底高度最高,Georgakakos方法下的云底高度明显比中国气象局和Barnes的算法略高(图2c, 2f, 2i中看出)。当LCL的高度越高,则越接近云底高度。

由图2的冬季图和春季、夏季、秋季的图进行对比可以得出,云底高度的最高值发生了区域变化,冬季最高值分布在青藏高原区。整体来看,云底高度均是西部高,东部低。对于西部地区,云层起到高云的保温作用,增强了西部的温室效应。

#### 2.1.3 空间分布的日变化

由图3中的02时分布图来看中国地区的云底高度分布趋势略不同于日均的整体分布趋势,其中

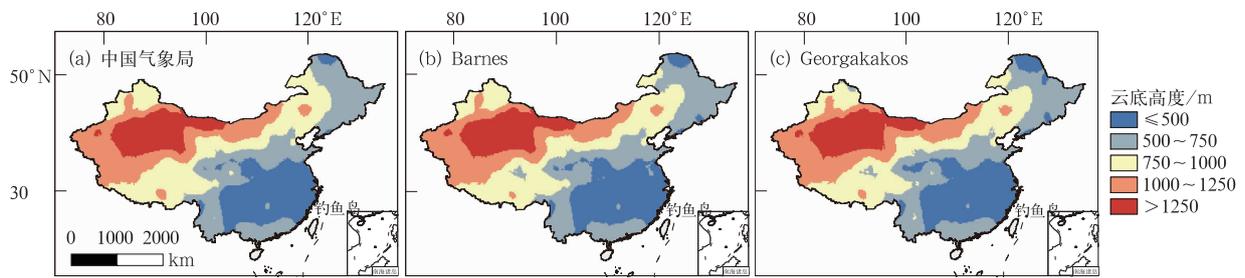


图 1 不同经验公式计算的 1960—2013 年中国云底高度的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of cloud base height by the different algorithms in China during 1960—2013

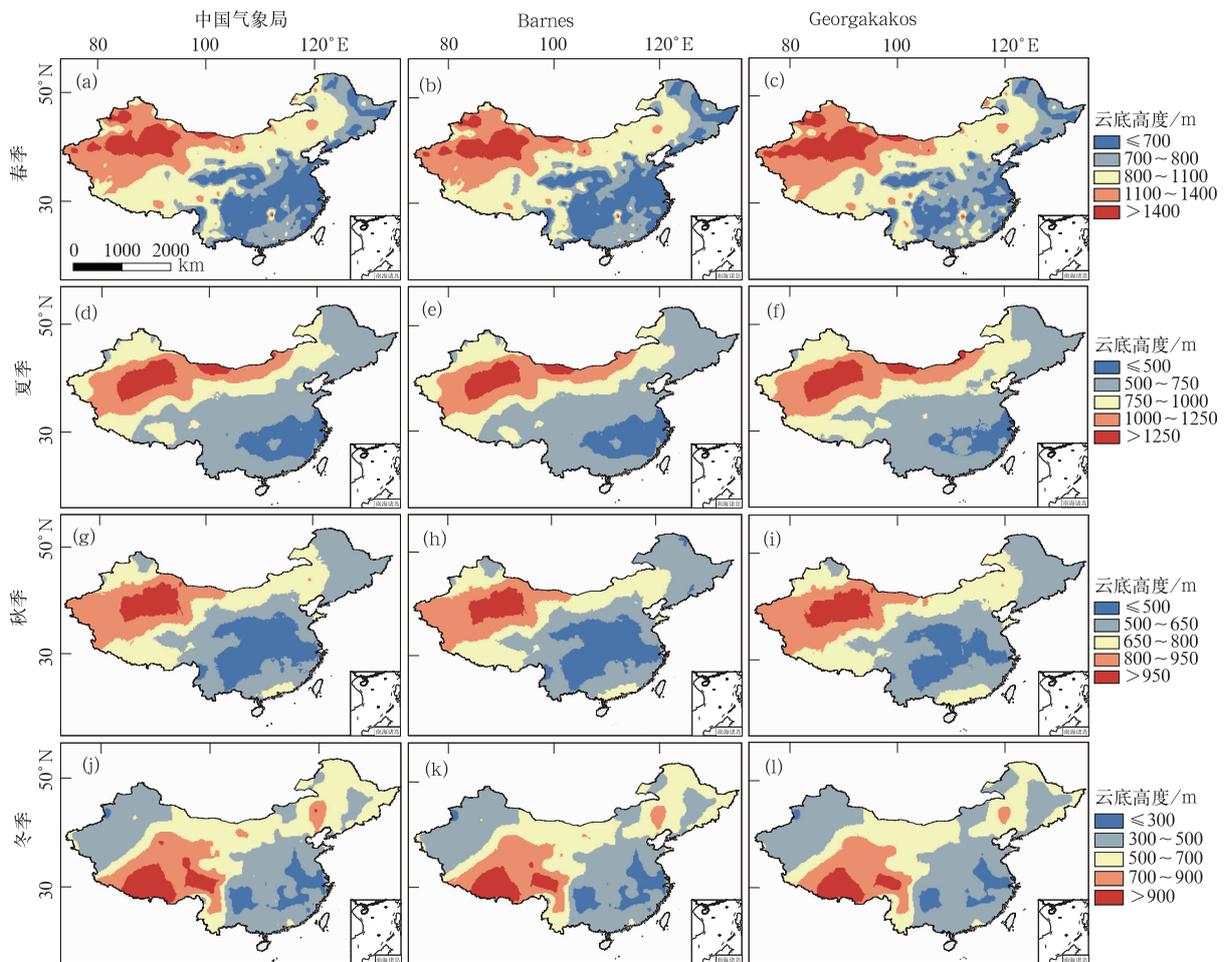


图 2 不同经验公式计算的 1960—2013 年基于四季的中国云底高度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of cloud base height based on the four seasons by the different algorithms in China during 1960—2013

中国的南方地区和黑龙江东部的云底高度普遍偏低,新疆中部的云底高度为全国最高值。从 08 时的云底高度分布图中可以看出,中国的西南地区的云底高度最低,新疆的中部的云底高度较高。14 时和 20 时的图中得出其云底高度普遍较高,整体趋势是自东南向西北逐渐增高。并且可以明显看出 Geor-

gakakos 等(1984)的算法下的 LCL 均高于中国气象局和 Barnes 算法下的 LCL,不过三种算法下的云底高度的趋势是一致的。就图 3 整体来看,云底高度的变化趋势均是自东南向西北逐渐增高,只是极值区略有差异。

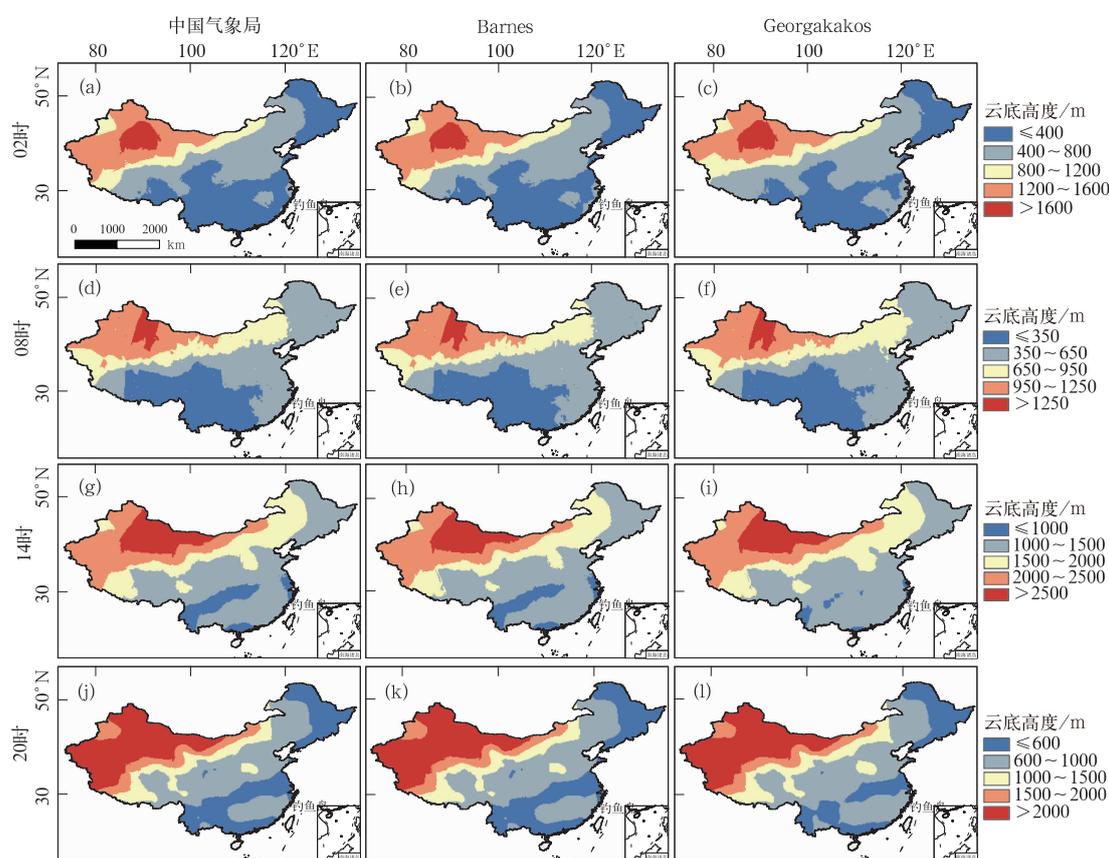


图 3 不同经验公式计算的 2013 年 8 月 25 日至 9 月 25 日的  
02 时、08 时、14 时和 20 时的中国云底高度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of cloud base height at 02:00, 08:00, 14:00, 20:00 BT respectively  
by the different algorithms in China from 25 August to 25 September 2013

#### 2.1.4 不同降水量等级的空间分布

中国气象局发布的日降水量( $R$ )共分为五个等级, $R < 10$  mm、 $10 \text{ mm} \leq R < 25$  mm、 $25 \text{ mm} \leq R < 50$  mm、 $50 \text{ mm} \leq R < 100$  mm 和  $R \geq 100$  mm, 分别用 I、II、III、IV、V 来表示(Gong et al, 2004)。由图 4 中的 I 级和 II 级图中可以看出云底高度的分布趋势较为明显, 其中江淮地区的云底高度最低, 新疆中部的云底高度最高, 总体为自东南向西北逐渐增高。图 4 中的 III 级图中由于有些站点的降水量等级在 54 年中没有达到 III 级的标准, 所以将其删除, 经筛选后共 617 个站点。其中云底高度的整体分布特征并不明显, 以新疆为代表的西北区的云底高度最高, 而广东、广西、内蒙古和海南的云底高度较高, 以江淮一带向周围地区云底高度逐渐增高。图 4 中的 IV、V 级的图中由于有些站点的降水量等级在 54 年中没有达到 IV、V 级的标准, 所以经过筛选后分别共有 523 和 418 个站点。其云底高度的空间分布特征

不明显, 其中 IV 级中新疆和青藏区的西北区的云底高度较低, 海南、内蒙古和新疆中部的云底高度较高。V 级图中, 黑龙江的东部的云底高度较低, 其余地区的云底高度都偏高。就图 4 整体而言, I、II 级图的整体变化趋势明显且同于日均、季节和小时的云底高度变化趋势, 即云底高度自东南向西北逐渐增高, III、IV、V 级图的变化趋势不明显。

#### 2.2 时间变化特征

为了更好地研究中国云底高度的时间变化特征, 本文从年际变化、季节变化和日变化三个方面进行研究。

##### 2.2.1 年际变化特征

中国四大自然区是北方地区、南方地区、西北地区和青藏高原地区, 四大自然区的自然地理特征不一, 则云底高度也有差别。根据图 5 可以看出, 三种算法下得出的变化规律基本一致。从 1960—2013

年的云底高度的年际差异较小,无明显的极值年份。就四大自然区之间的比较来说,西北地区的云底高度为最高值,其次是青藏高原地区,北方地区和南方地区的云底高度均较低。由于西北地区和青藏高原

地区的降水量均低于北方地区和南方地区,其云底高度均高于全国的均值,北方地区和南方地区的云底高度均低于全国的均值。

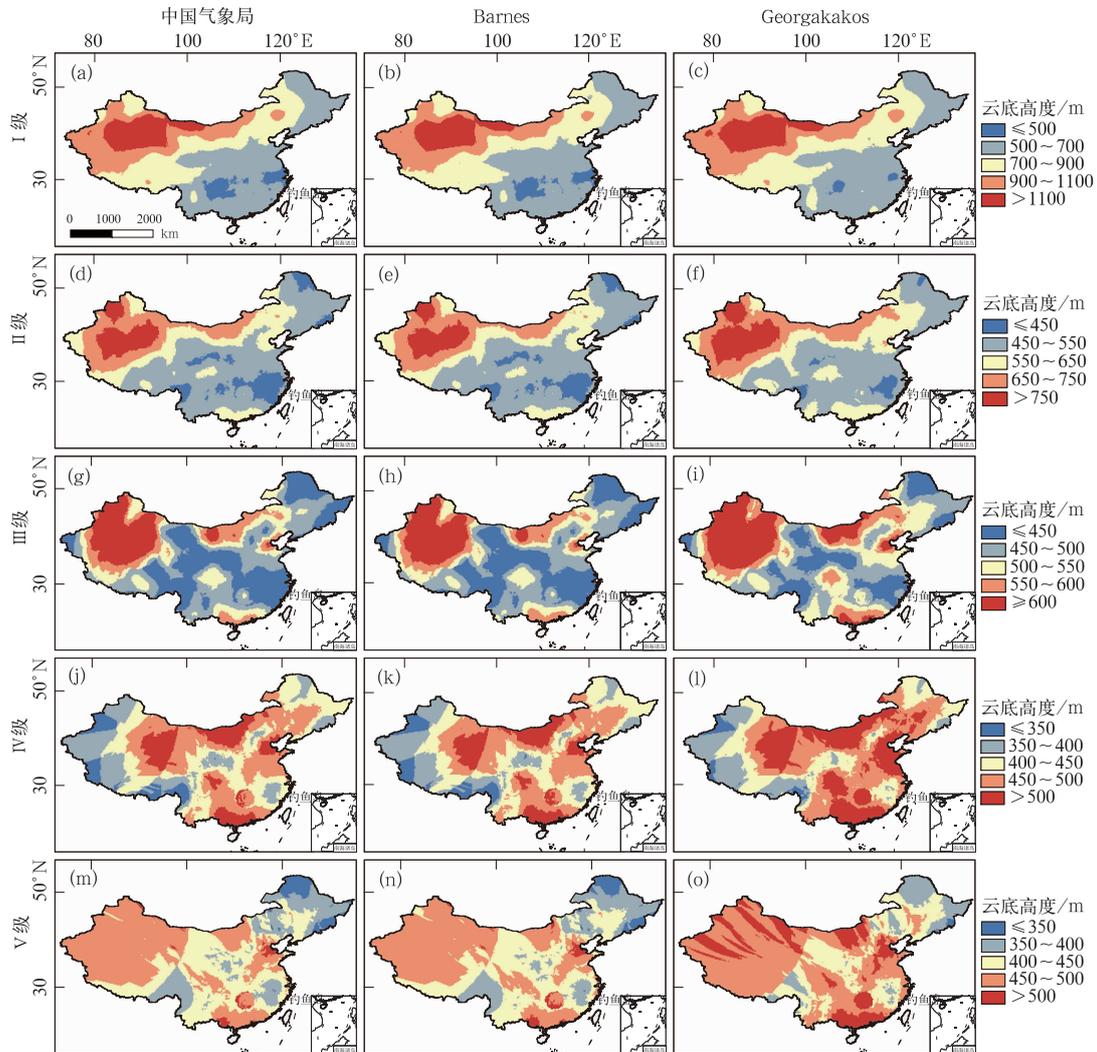


图 4 同图 2,但为基于不同降水强度

Fig. 4 Same as Fig. 2, but based on different precipitation intensities

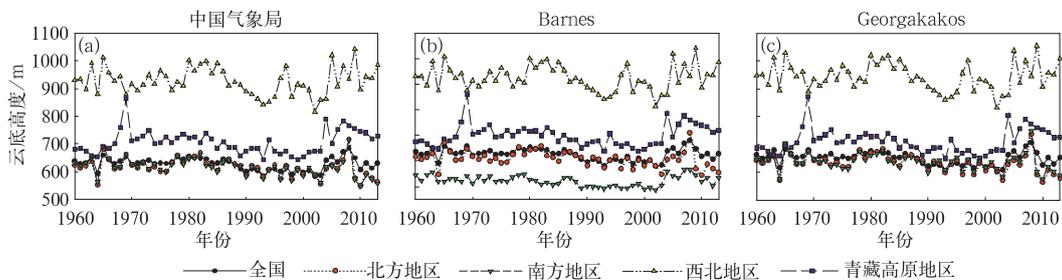


图 5 不同经验公式计算的 1960—2013 年中国四大自然区云底高度的年变化

Fig. 5 Annual variation of cloud base height by the different algorithms over four nature areas in China during 1960—2013

根据图 6 可以看出中国四大自然区除青藏高原地区外云底高度均呈下降趋势,其中北方地区的云底高度下降趋势较快( $r^2 = 0.1079$ ),青藏高原地区的云底高度呈逐年缓慢增高的趋势( $r^2 = 0.0072$ ),

即青藏高原区高云的温室效应逐年缓慢增强,但是增强趋势不明显。而青藏高原区的平均降水呈弱增加趋势(林厚博等,2015),与该区温室效应弱增强相吻合。

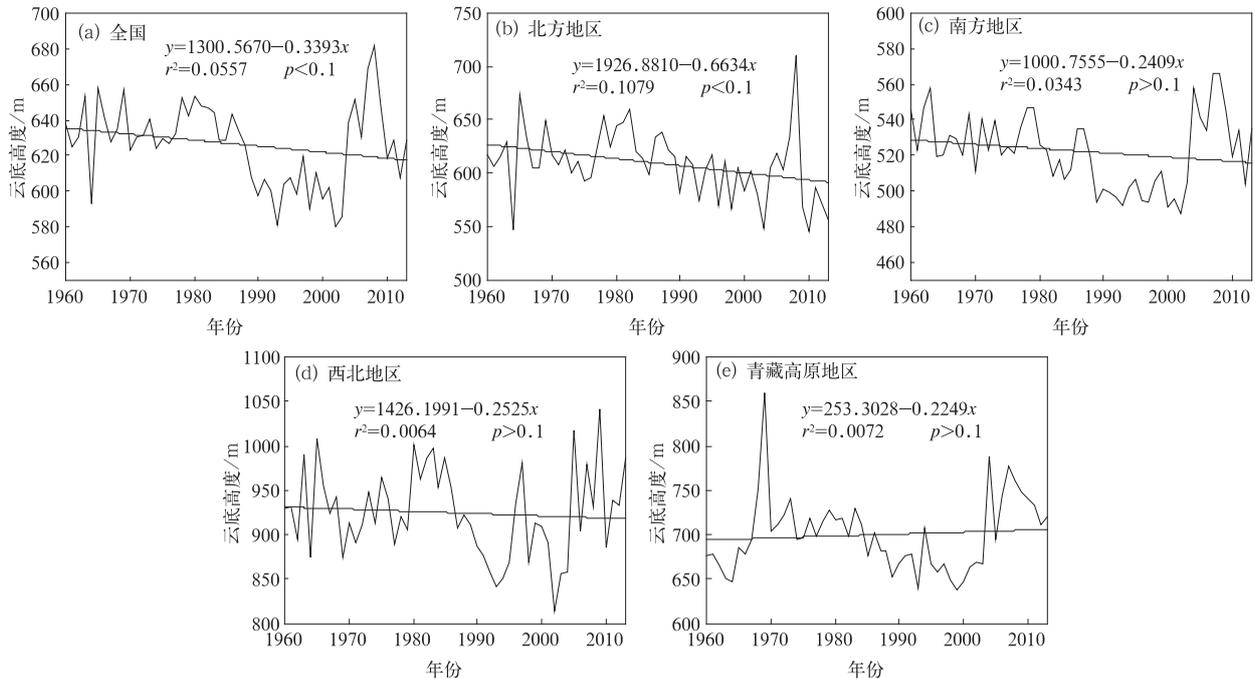


图 6 基于 Barnes 算法下 1960—2013 年中国四大自然区云底高度的线性趋势

Fig. 6 Linear trend of cloud base height over four nature areas based on Barnes algorithm in China during 1960—2013

青藏高原地区自 1960 年以来,云底高度呈缓慢增加趋势,但是增加趋势不明显,未通过  $\alpha = 0.1$  的显著性水平检验,即该区的云底高度变化在长时间尺度内增加趋势不显著。除此之外,在高海拔地区,气象要素变化复杂。近年来,中东急流偏强,有利于欧洲中东部冷空气进入西南地区,使得青藏高原地区的气温偏低(董李丽等,2015)。并且,近 15 年内(1998—2012 年)相对湿度降低了 10%,同期到达地表的太阳辐射却略微减少(Li et al, 2015)。由于根据表 1 得知,云底高度与相对湿度的相关性较降水量更高,所以当青藏高原区降水呈弱增加趋势,但由于相对湿度显著减少,即云底高度呈弱增加趋势。

### 2.2.2 季节变化特征

根据图 7 可以看出云底高度的季节变化比较明显,春季向冬季逐渐降低,春季的云底高度最高,夏、秋季其次,冬季的云底高度最低。春、夏季的云底高度高于四季平均的云底高度,秋、冬季的云底高度低于四季平均的云底高度。

大气中的云分为水云和冰云,其中水云和冰云

的物理特性不同(Yang et al,2013)。云的光学特性不同,导致云对辐射的影响不同。由于冬季出现冰云的频率达 80% 以上(叶培龙等,2014),所以冬季的云底高度是全年中的最低值。

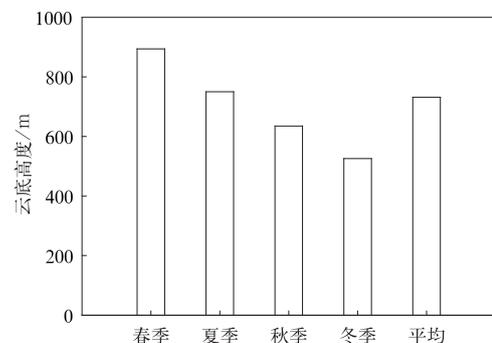


图 7 1960—2013 年中国云底高度的季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of cloud base height in China during 1960—2013

### 2.2.3 日变化特征

云底高度除季节变化外,还有显著的日变化规

律。根据图 8 可以看出三种算法下得出的云底高度的变化趋势较为一致,均是由 02 时向 08 时逐渐降低,然后逐渐增高至 14 时为最高值,14 时至 20 时云底高度又逐渐降低。其中 14 时的云底高度为最高值大约在 1500 m,08 时的云底高度为最低值大约在 500 m。

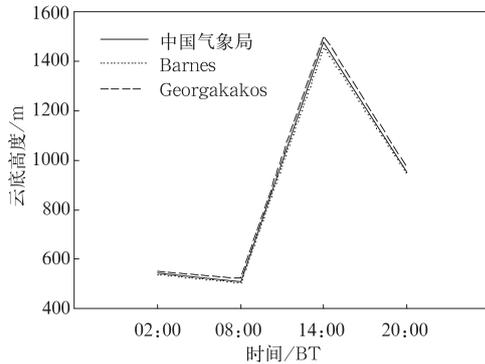


图 8 2013 年 8 月 25 日至 9 月 25 日中国云底高度的小时变化  
Fig. 8 Hourly variation of cloud base height in China from 25 August to 25 September 2013

抬升凝结高度总是略低于云底高度,所以计算得出的抬升凝结高度值越高,则越接近于云底高度。利用 Georgakakos 的经验公式得出的云底高度较其他两种算法高,即得出的 LCL 更加地接近云底高度,精度更高更加地准确。由于中国气象局的经验公式的  $a$  值受到不同  $T$  的范围的影响,即在计算 LCL 的时候会进行经验公式的累计运算,较 Georgakakos 的算法来说误差略大。

### 2.3 云底高度和降水量、相对湿度的相关性

大气中的水汽含量越高越容易达到饱和而发生水汽凝结,相应的就容易发生降水。云的形成正是水汽凝结在凝结核上组成的外象可以看到的实体,所以相对湿度和降水量的变化会影响云底高度的变化。由图 9 可以看出,四大自然区中西北的降水量和相对湿度值最低,青藏高原地区、北方地区、南方地区的降水量和相对湿度逐渐增高。相应的云底高度是西北地区的云底高度最高,青藏高原地区、北方地区、南方地区的云底高度逐渐降低。即相对湿度和降水量小的地区云底高度高;相对湿度和降水量大的地区云底高度低。三种算法下得出的规律一致,均是降水量、相对湿度与云底高度成负相关。

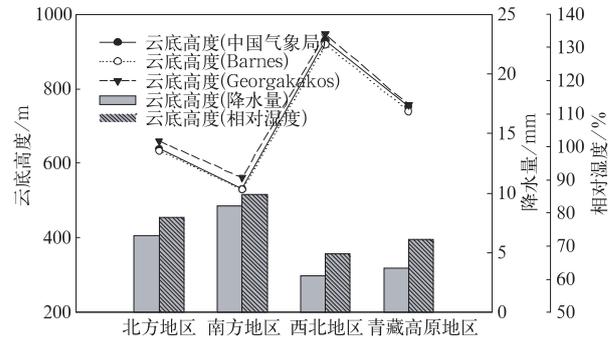


图 9 1960—2013 年中国降水量、相对湿度和云底高度的相互关系

Fig. 9 Relationship between precipitation amount, relative humidity and cloud base height in China during 1960—2013

由表 1 可以得出 1960—2013 年中三种算法下降水量和云底高度的均值的相关系数分别为  $-0.47$ 、 $-0.46$ 、和  $-0.44$ ,更进一步表明降水量和云底高度呈负相关(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验),相关系数的绝对值均小于  $0.5$ 。1960—2013 年中三种算法下的相对湿度和云底高度的均值的相关系数分别为  $-0.81$ 、 $-0.81$  和  $-0.79$ ,更进一步说明相对湿度和云底高度呈负相关(通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验),并且具有显著的相关性,相关系数的绝对值均大于  $0.7$ 。

表 1 1960—2013 年降水量和相对湿度与云底高度的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between precipitation amount, relative humidity and cloud base height in China during 1960—2013

方法	$r$	
	降水量和云底高度	相对湿度和云底高度
中国气象局	$-0.47^{**}$	$-0.81^{**}$
Barnes	$-0.46^{**}$	$-0.81^{**}$
Georgakakos	$-0.44^{**}$	$-0.79^{**}$

注: \*\* 表示通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。

Note: \*\* denote passing through the  $\alpha=0.01$  significant level of test.

据图 10 中的 I 可以得出降水量和云底高度的相关系数的空间分布特征,也得出中国大部分地区降水量和云底高度的相关系数的绝对值  $<0.3$ 。仅黑龙江西部、山东半岛和内蒙古东部的相关性较好。根据图 10 的 II 可以得出相对湿度和云底高度的相关系数的空间分布特征,也得出中国大部分地区的相对湿度和云底高度的相关系数的绝对值  $>0.5$ ,说明相对湿度和云底高度在中国大部分地区的相关性

显著。图 10 中看出,无论是降水量还是相对湿度,他们与云底高度的相关系数在全国的分布均是有正有负。在中国的相关系数的分布看出,中国中部小

部分地区的降水量、相对湿度和云底高度呈正相关,其余大部分地区呈负相关,并且可以说明影响云底高度因素不只有降水量和相对湿度。

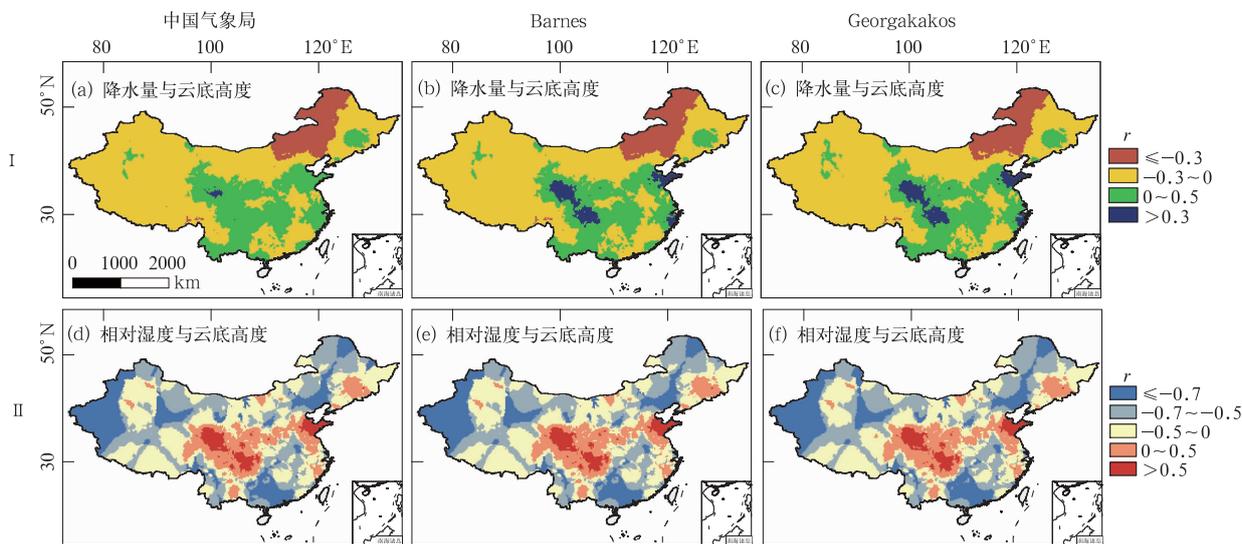


图 10 1960—2013 年降水量、相对湿度和云底高度的相关系数的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of correlation coefficients between precipitation, relative humidity and cloud base height in China during 1960—2013

### 3 讨 论

云对地气系统的辐射能量收支起到重要的调节作用,能够将太阳部分的短波辐射发射回太空,并且可以发射来自地面的长波辐射,从而对地面起到保温作用(吕达仁等,2003),这种调节不仅依赖于云量的时空分布,云底高度的时空分布和外推应用也是至关重要的影响因素(王帅辉等,2012)。

尽管云高有长时间的观测和记录,但是对于云的时空分布研究较少。空间上看,王帅辉等(2011)利用 CloudSat 资料研究得出,中国东部地区下层云峰值明显较西北地区的低,与本文研究得出的云底高度自东南向西北逐渐增高相符;时间上看,云底高度有明显地季节变化,其中冬季的云底高度最低(王胜杰等,2010)。影响云底高度的因素极为复杂,本文研究着重研究了降水量和相对湿度对云底高度的影响。相对湿度对云底高度的影响几乎成显著的线性关系,两者的相关性较好(郭婧晗等,2015),均与云底高度有显著的相关性,均通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验,其中相对湿度与云底高度的相关性较高。中国西北地区降水量变化倾向率呈微弱的上

升趋势( $0.17 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ),由图 5 和图 6d 可以看出,即降水量上升则降水云的云底高度呈微弱的降低趋势(黄小燕等,2015)。西北地区由于生态环境比较脆弱,相对降水量较少,自 20 世纪 60 年代起就呈波动趋势变化,导致云底高度也呈波动趋势变化。西北地区的相对湿度和云量均比较少,导致云底高度较其他地区的高(宜树华等,2003)。利用 ERA 和站点数据计算,1986 年左右在西北地区发生了一次明显的气候跃变,全区年平均气温上升  $0.51^\circ\text{C}$ ,降水量上升  $5.2\%$ ,即云底高度有明显的下降,20 世纪 90 年代中期到 2000 年期间降水量有所下降,即云底高度有所升高(白庆梅,2010)。20 世纪 80 和 90 年代为多雨期,21 世纪以来降水量变化幅度较大,变化范围较大,即 21 世纪以来云底高度的变化比较剧烈(陈志昆等,2013)。气溶胶作为大气中重要的微量成分,可以通过影响到达地表的太阳辐射量从而对云底高度也产生不可忽视的影响(段婧等,2008;Solomon, 2011);气溶胶可以作为云的凝结核来间接影响云底高度的分布,从而影响着地气系统的辐射收支(杨慧玲等,2011);气溶胶的光学厚度与云的光学厚度呈正相关,且最大相关系数达 0.77(石睿等,2015)。

地形的差异严重影响着气温和降水的变化 (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015; 祁威等, 2013), 间接影响着云底高度的空间分布。云底高度的变化趋势会有“牛眼”现象是由于一些站点具有特殊地形所导致的, 如本文图 1~图 4 中的站点巴林左旗(54027)、巴塘(56247)、双峰(57774)、五道梁(52908)和小金(56178)等, 都是由于地形因素导致了云底高度的异常变化。上述站点多分布在山区, 该地区降水极为复杂(祁威等, 2013; 阎丽凤等, 2013), 而云底高度与降水量和相对湿度之间都有显著的相关性(表 1), 使得地形复杂的小区域云底高度会产生特殊的分布。此外, 在高海拔地区通过对云的长期观察发现, 云层和云的属性的变化都会影响短波和长波辐射, 在凝结高度附近通过潜热释放的热量导致一系列的增温效果(Diaz et al, 1996), 导致 LCL 发生相应的变化。如果凝结高度上升, 伴随着气温变暖, 降温带将会出现新的云基线 (Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015), 从而导致某些地形特殊的地区云底高度异常, 即进行插值的时候产生一些“牛眼”现象。图 10 中相关系数存在正相关和负相关, 说明由于地形的影响, 云底高度和降水量、相对湿度的相关性存在正负。

## 4 结 论

本文研究了中国云底高度的时空分布特征, 并对云底高度和降水量、相对湿度的相关性进行了分析, 得出以下结论:

(1) 中国地区降水云的云底高度空间分布特征的整体变化趋势是自东南向西北逐渐增高, 其中江淮一带最低, 新疆中部最高。春、夏、秋季的云底高度的空间分布符合自东南向西北逐渐增高的趋势, 冬季的云底高度最高值出现在青藏高原地区。在一日内不同时刻的云底高度的空间分布也符合自东南向西北逐渐增高的趋势, 但降水量等级只有 I、II 级的时候符合上述变化趋势。

(2) 中国地区降水云的云底高度的年变化无明显的极值年份, 年际变化小。季节上的变化显著, 其中春季的云底高度最高大约为 900 m, 夏、秋、冬依次降低, 而冬季则是由于冰云的影响下云底高度为最低大约为 500 m。一日内的小时变化明显, 其中自 02 时向 08 时逐渐降低, 至 08 时为最低值大约为

500 m, 自 08 时向 14 时逐渐增高达最高值, 大约 1500 m, 14 时至 20 时又逐渐降低。

(3) 中国地区降水云的云底高度和降水量、相对湿度的相关性整体上看呈负相关, 且与降水量的相关系数在三种算法下依次为 -0.47、-0.46 和 -0.44。与相对湿度的相关系数在三种算法下依次为 -0.81、-0.81 和 -0.79, 具有显著的相关性。

(4) 分别运用中国气象局、Barnes、Georgakakos 的经验公式计算 LCL 从而近似降水云的云底高度, 三种算法下归纳中国地区的云底高度的时空变化特征趋于一致, 其中 Georgakakos 的算法得出的云底高度略高。

## 参考文献

- 白庆梅. 2010. 亚洲干旱/半干旱区近几十年区域气候变化. 兰州: 兰州大学.
- 陈志昆, 张书余, 雒佳丽, 等. 2013. 中国西北地区降水异常的气候分析. 中国沙漠, 33(6): 1874-1883.
- 段婧, 毛节泰. 2008. 气溶胶与云相互作用的研究进展. 地球科学进展, 23(3): 252-261.
- 董李丽, 李清泉, 丁一汇. 2015. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征. 气象, 41(10): 1177-1189.
- 高茜, 王广河, 史月琴. 2011. 华北层状云系人工增雨个例数值研究. 气象, 37(10): 1241-1251.
- 郭婧晗, 薛惠文, 刘晓阳. 2015. 北京地区夏季云出现概率及云底高度分布的特征分析. 北京大学学报(自然科学版), 51(4): 718-724.
- 何小东, 李建庭, 张乃升. 2012. 一次层状云降水过程云底高度计算及演变规律分析. 科技视界, (23): 73-74.
- 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 2015. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征. 生态学报, 35(5): 1359-1370.
- 林厚博, 游庆龙, 焦洋, 等. 2015. 基于高分辨率格点观测数据的青藏高原降水时空变化特征. 自然资源学报, 30(2): 271-281.
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 27(4): 552-566.
- 潘琳璐, 吕达仁. 2012. 一种利用地基高光谱干涉仪 AERI 遥感云底等效高度和等效发射率的方法. 中国科学#地球科学, 42(3): 447-457.
- 祁威, 张懿铨, 高俊刚, 等. 2013. 1971—2009 年珠穆朗玛峰地区尼泊尔境内气候变化. 地理学报, 68(1): 82-94.
- 山夫. 1987. 计算抬升凝结高度的一个新方法. 沙漠与绿洲气象, (3): 44.
- 石睿, 王体健, 李树, 等. 2015. 东亚夏季气溶胶-云-降水分布特征及其相互影响的资料分析. 大气科学, 39(1): 12-22.
- 陶法, 马舒庆, 秦勇, 等. 2013. 基于双目成像云底高度测量方法. 应用气象学报, 24(3): 323-331.
- 王胜杰, 何文英, 陈洪滨, 等. 2010. 利用 CloudSat 资料分析青藏高原、高原南坡及南亚季风区云高度的统计特征量. 高原气象, 29

- (1):1-9.
- 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等. 2011. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析. *高原气象*,30(1):38-52.
- 王帅辉,姚志刚,韩志刚,等. 2012. CloudSat 云底高度外推估计的可行性分析. *气象*,38(2):210-219.
- 阎丽凤,车军辉,周雪松,等. 2013. 泰山地形对一次局地强降水过程动力作用的数值模拟分析. *气象*,39(11):1393-1401.
- 严卫,韩丁,赵现斌,等. 2012. 基于毫米波雷达,无线电掩星和探空仪资料的云边界高度对比研究. *地球物理学报*,55(7):2212-2226.
- 杨冰韵,张华,彭杰,等. 2014. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征. *高原气象*,33:1105-1118.
- 杨慧玲,肖辉,洪延超. 2011. 气溶胶对云宏观特性和降水影响的研究进展. *气候与环境研究*,16(4):525-542.
- 叶培龙,王天河,尚可,等. 2014. 基于卫星资料的中国西部地区云垂直结构分析. *高原气象*,33(4):977-987.
- 宜树华,刘洪利,李维亮,等. 2003. 中国西北地区云时空分布特征的初步分析. *气象*,29(1):7-11.
- 赵妹慧,班显秀,袁健,等. 2014. 8,9月沈阳地区卫星观测云垂直结构的气候特征分析. *高原气象*,33(6):1640-1647.
- 章文星,吕达仁,常有礼. 2007. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性的模拟研究. *地球物理学报*,50(2):354-363.
- 中国气象局. 2007. 地面气象观测规范第2部分:云的观测. QX/T46-2007. 北京:气象出版社.
- 周非非,周毓荃,王俊,等. 2010. FY-2 卫星反演的云顶高度与多普勒雷达回波顶高的关系初探. *气象*,36(4):43-50.
- 周毓荃,欧建军. 2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究. *气象*,36(11):50-58.
- Andreev M S,Chulichkov A I,Emilenko A S,et al. 2014. Estimation of cloud height using ground-based stereophotography: Methods, error analysis and validation//SPIE Asia pacific remote sensing. International Society for Optics and Photonics,92590N-92590N-6. DOI:10.1117/12.2069800.
- Barnes,S L. 1968. An empirical shortcut to the calculation of temperature and pressure at the lifted condensation level. *J Appl Meteor Clim*,7(3):511.
- Boucher O,Randall D,Artaxo P,et al. 2013. Clouds and aerosols//Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press,571-657.
- Cesana G,Chepfer H. 2012. How well do climate models simulate cloud vertical structure? A comparison between CALIPSO-GOCCP satellite observations and CMIP5 models. *Geophys Res Lett*,39(20):1-6.
- Dessler A E,Palm S P,Spinhirne J D. 2006. Tropical cloud-top height distributions revealed by the ice,cloud,and land elevation satellite (ICESat)/Geoscience laser altimeter system (GLAS). *J Geophys Res: Atmospheres*, 111, D12215. DOI: 10.1029/2005JD006705.
- Diaz H F,Graham N E. 1996. Recent changes in tropical freezing heights and the role of sea surface temperature. *Nature*, 383(6569):152-155.
- Dong X,Xi B,Minnis P. 2006. A climatology of midlatitude continental clouds from the ARM SGP central facility. Part II Cloud fraction and surface radiative forcing. *J Climate*, 19(9):1765-1783.
- Georgakakos K P,Bras R L. 1984. A hydrologically useful station precipitation model;1. Formulation. *Water Resour Res*,20(11):1585-1596.
- Gong D Y,Shi P J,Wang J A. 2004. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. *J Arid Environ*, 59(4):771-784.
- Ji F,Wu Z,Huang J,et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend. *Nat Clim Change*,4(6):462-466.
- Li Q,Yang S,Xu W,et al. 2015. China experiencing the recent warming hiatus. *Geophys Res Lett*,42(3):889-898.
- Mountain Research Initiative EDW Working Group. 2015. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nat Clim Change*,5(5):424-430.
- Nishi N,Hamada A,Ohigawa M,et al. 2011. Analysis of tropical cloud systems using a new cloud-top height data by geostationary satellite split-window measurements trained with cloudsat data//American Geophysical Union, Fall Meeting Abstracts. 1: 0195.
- Nuijens L,Serikov I,Hirsch L,et al. 2014. The distribution and variability of low-level cloud in the North Atlantic trades. *Quart J Roy Meteor Soc*,140(684):2364-2374.
- Rossow W B,Lacis A A. 1990. Global,seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part II. cloud properties and radiative effects. *J Climate*,3(11):1204-1253.
- Schiffer R A,Rossow W B. 1983. The international satellite cloud climatology project (ISCCP)-The first project of the world climate research programme. *Bull Amer Meteor Soc*,64:779-784.
- Solomon S,J S Daniel,R R Neely III,et al. Thomason (2011). The persistently variable "background" stratospheric aerosol layer and global climate change. *Science*,333:1219-1223.
- Stubenrauch C J,Rossow W B,Kinne S,et al. 2013. Assessment of global cloud datasets from satellites:project and database initiated by the GEWEX radiation panel. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(7):1031-1049.
- Wang W C,Gong W,Kau W S,et al. 2004. Characteristics of cloud radiation forcing over east China. *J Climate*,17(4):845-853.
- Yang G,Tongwen W,Baode C,et al. 2013. A numerical simulation of microphysical structure of cloud associated with the 2008 Winter Freezing Rain over Southern China. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 91(2):101-117.